تشخیص خرابی دیوار برشی فولادی بااستفاده از الگوریتم موجک★

امیر عباسی[۱] سید روح‌الله حسینی واعظ[۲] غلامرضا قدرتی امیری[۳]

چکیده *یکی از روش‌های تشخیص خرابی، روش‌های دینامیکی مبتنی بر پایهٔ سیگنال می‌باشد که می‌توان بااستفاده از پردازش سیگنال اقدام به شناسایی خرابی در سازه‌ها نمود. در این مطالعه، به‌منظور تشخیص محل و میزان آسیب در دیوارهای برشی فولادی از الگوریتم موجک استفاده شده‌است؛ بدین‌صورت که شکل مودی حاصل از آنالیز مودال به‌عنوان سیگنال ورودی توسط تبدیل موجک تجزیه می‌گردد و درصورت وجود خرابی، می‌تواند محل و موقعیت دقیق آن تشخیص داده‌شود. درنتیجه بااستفاده از این تبدیل، بدون نیاز به اطلاعات سازه سالم می‌توان سناریوهای خرابی احتمالی را که در سازه رخ می‌هد از طریق اغتشاشاتی که در سیگنال یا همان شکل مودی دیوار برشی فولادی ایجاد می‌گردند، شناسایی نمود.*

واژه‌های کلیدی تشخیص خرابی، پردازش سیگنال، دیوار برشی فولادی، شکل مودی سازه، الگوریتم موجک.

Damage Detection of Steel Plate Shear Walls by Wavelet Transform

A. Abbasi S. R. Hoseini Vaez Gh. Ghodrati Amiri

Abstract *One of the methods for damage detection is dynamic methods based on the signal, which can be used to detect damage in the structures through signal processing. In this study, wavelet transform is used in order to determine the location and extent of the damage in steel plate shear walls so that the mode shape of modal analysis is decomposed as the input signal by wavelet transform and in the case of damage, it is possible to identify its accurate location. As a result, by using this transform without information of healthy structure, the possible damage scenarios that occur in the structure can be detected through disturbances which are created in the signal or the mode shapes of steel plate shear walls.*

Key Words Damage Detection, Signal Processing, Steel Plate Shear Walls, Mode Shape of Structure, Wavelet Algorithm.

★ تاریخ دریافت مقاله ۹۴/۷/۲۰ و تاریخ پذیرش آن ۹۵/۹/۲۸ می‌باشد.

(۱) دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکدهٔ فنی و مهندسی، دانشگاه قم.

(۲) نویسندهٔ مسئول، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکدهٔ فنی و مهندسی، دانشگاه قم.

(۳) استاد، دانشکدهٔ مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران.

Email: hoseinivaez@gmail.com

مقدمه

پایش سلامت سازه یک روش ارزیابی غیرمخرب است که وضعیت تمامی اجزای تشکیل‌دهندهٔ سازه را در طول عمر آن بررسی می‌نماید و میزان سلامت کل سازه را تخمین می‌زند. آسیب با اثرات نامطلوبی که برروی سازه می‌گذارد موجب اختلال در عملکرد کنونی و یا آیندهٔ سازه می‌گردد. بدیهی است که هزینه‌های تعمیر سازه‌های آسیب‌دیده و همین‌طور هزینه‌های نگهداری و بازرسی سازه‌های جدیدتر در حجم بالا بسیار هنگفت خواهد بود. هم‌چنین تشخیص به‌موقع آسیب و اقدام در جهت رفع عیوب آن، باعث افزایش عمر مفید سازه می‌شود. لذا پایش سلامت سازه‌ها از اهمیت به‌سزایی برخوردار است و از این‌رو، در دهه‌های اخیر تحقیقات فراوانی در این زمینه انجام گرفته‌است. آسیب‌های سازه‌ای از قبیل (ترک، خوردگی، کمانش، تورق و غیره) می‌توانند به‌طرق مختلفی ایجاد شوند که همگی منجر به کاهش سختی یا جرم سازه می‌شوند. بدین‌منظور، یکی از روش‌های شناسایی خرابی براساس تغییر در خصوصیات فیزیکی سازه مانند سختی می‌باشد که موجب تغییر در مشخصات دینامیکی سازه شامل فرکانس‌های طبیعی و شکل‌های مودی می‌گردد. درنتیجه با مقایسهٔ پاسخ مودال سازه بین حالت سالم و آسیب‌دیده می‌توان حضور یا عدم حضور خرابی را شناسایی نمود. با این وجود، زمانی که رفتار سازهٔ سالم در دسترس نیست بایستی این کار تنها بااستفاده از پاسخ‌های سازهٔ آسیب‌دیده انجام پذیرد.

در همین راستا یکی از روش‌های مورد استفاده، روش‌های دینامیکی مبتنی بر پایهٔ سیگنال می‌باشد که می‌توان بااستفاده از پردازش سیگنال اقدام به شناسایی خرابی در سازه‌ها نمود. در این روش، منظور از سیگنال همان پاسخ سازهٔ آسیب‌دیده می‌باشد که به‌عنوان یک سیگنال ورودی، پردازش می‌گردد و موقعیت دقیق خرابی به‌وجودآمده را نشان می‌دهد. در این زمینه یکی از روش‌های پر کاربرد که طی دههٔ اخیر نیز بسیار مورد توجه قرار گرفته‌است، تبدیل موجک می‌باشد که درادامه به شرح برخی از کارهای انجام‌گرفته در این زمینه اشاره می‌گردد.

درمورد تشخیص خرابی در صفحات، بی‌سا و همکاران [1] بااستفاده از تبدیل موجک دوبعدی روشی را ارائه دادند. آنها این روش را بر روی صفحاتی که به‌صورت المان محدود در نرم‌افزار مدل شده‌بود، به‌کار بردند و موفق شدند تا حدودی موقعیت آسیب را در سازه تشخیص دهند.

اثر مرتبهٔ مودها بر میزان قابلیت تشخیص آسیب سازه‌ها، توسط روکا [2] مورد بررسی قرار گرفته‌است. او بااستفاده از تبدیل موجک پیوسته و پس از بررسی هشت مود اول یک تیر طره نشان داد که هرچه مرتبهٔ شکل مودی بالاتر باشد، جواب‌های قابل اطمینان‌تری به‌دست می‌آید.

سولیس و همکاران [3] بااستفاده از تبدیل موجک روشی را برای تشخیص خرابی ارائه نمودند که علاوه بر این‌که موقعیت آسیب را از روی تغییر در شکل‌های مودی بین سازهٔ سالم و آسیب‌دیده تشخیص می‌داد، توانستند روشی مناسب برای فائق آمدن بر مشکلاتی که در شناسایی آسیب‌های ابتدا و انتهایی طول سازه به‌وجود می‌آمد ارائه دهند.

قدرتی و همکاران [4]، روشی برای تشخیص خرابی بااستفاده از تبدیل موجک گسسته هنگامی که ترک‌هایی متعدد در یک تیر رخ دهند را پیشنهاد نمودند. علاوه بر این، اصول انتخاب یک تابع موجک مناسب و هم‌چنین حضور نویزهای تصادفی در سیگنال‌های ورودی را مورد ارزیابی قرار دادند.

تشخیص خرابی یک ساختمان شش طبقهٔ بتنی بااستفاده از تبدیل موجک توسط پاتل و همکاران [5] مورد بررسی قرار گرفت. بدین‌منظور برای جرم‌های مختلف، سیگنال‌های ارتعاش در تراز هر طبقه از ساختمان ثبت گردید. نتایج آنها نشان می‌دهد که ضرایب موجک ارتباط مستقیمی با تغییر در خصوصیات

فیزیکی سازه از جمله جرم دارند.

تشخیص خرابی یک سازه بااستفاده از تبدیل موجک را می‌توان با قرار دادن سنسور در ترازهای معین از یک سازه بررسی نمود. با این عمل می‌توان آسیب به‌وجودآمده در هر قسمت از سازه را شناسایی نمود. بدین‌صورت که هر سنسور، پاسخ‌های به‌دست‌آمده از سازه را به‌عنوان سیگنال ورودی برای پردازش سیگنال، به تبدیل موجک وارد می‌نماید. سپس این تبدیل با تجزیهٔ سیگنال ورودی، می‌تواند درصورت وجود خرابی، محل دقیق آن را نشان دهد.

در این مطالعه سعی شده‌است تشخیص خرابی دیوار برشی فولادی بااستفاده از الگوریتم موجک و ثبت پاسخ در ترازهای مختلف دیوار، مورد بررسی قرار گیرد. بدین‌منظور با قرار دادن سنسور در نقاط مشخصی از دیوار، پاسخ‌های مودال سازه ثبت می‌گردند و الگوریتم موجک پس از تجزیهٔ سیگنال ورودی، خرابی‌های احتمالی را نشان خواهد داد.

تعریف تبدیل موجک

تبدیل سیگنال یک ابزار ریاضی رایج است که به‌طور گسترده در پردازش سیگنال استفاده می‌شود. هدف از اعمال یک تابع ریاضی بر یک سیگنال، به‌دست آوردن اطلاعات اضافه‌ای است که در سیگنال خام اولیه قابل دسترس نمی‌باشند. یکی از رایج‌ترین روش‌ها در زمینهٔ پردازش سیگنال، تبدیل فوریه می‌باشد. ضرایب به‌دست آمده از این تبدیل، شباهت بین سیگنال مورد نظر و توابع سینوسی به‌کار رفته در تبدیل فوریه را ارائه می‌دهند. ضرایب فوریه برای تابع سیگنال $f(t)$ به‌صورت زیر ارائه می‌شود [6]:

$$f(\omega)=\int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-i\omega t}dt \qquad (۱)$$

که در آن t و ω متغیر زمانی و فرکانسی می‌باشد.

با این‌حال، روش تبدیل فوریه به‌دلیل استفاده از یک سری توابع سینوس و کسینوس، تنها زمانی به‌کار می‌آید که خواص آماری یک سیگنال در طول زمان ثابت باشد و از این‌رو، برای سیگنال‌های غیرایستا مانند پاسخ‌های به‌دست‌آمده از یک سازه (که محتوای فرکانسی با زمان تغییر می‌کند) نمی‌تواند تقریب مناسبی را ارائه دهد. ضعف دیگری که در تبدیلات فوریه مشاهده می‌شود، این نکته است که تنها پارامتر مورد بررسی، فرکانس سیگنال می‌باشد و هیچ اطلاعاتی از موقعیت سیگنال مورد بررسی ارائه نمی‌دهد.

البته این ضعف در تبدیل فوریهٔ زمان کوتاه تاحدی برطرف گردید، بدین صورت که از یک تابع پنجرهٔ متحرک استفاده می‌شود که در زمان τ قرار می‌گیرد و برای هر زمان τ خاص، یک تبدیل فوریه زمان کوتاه محاسبه می‌گردد. به‌طور متناوب، پنجره در راستای زمان انتقال پیدا می‌کند و تبدیل فوریه اعمال می‌شود تا بدین‌طریق تبدیل فوریهٔ کل سیگنال محاسبه گردد. البته انتخاب اندازهٔ پنجره‌ها بایستی به‌نحوی باشد که فرض ایستا بودن برای تمام بخش‌های جداشده برقرار باشد. یک تبدیل فوریهٔ زمان کوتاه به‌صورت رابطهٔ زیر ارائه می‌گردد [7]:

$$STFT_x^w(\tau,f)=\int_{-\infty}^{+\infty} x(t)\,w(t-\tau)e^{-j2\pi ft}dt \qquad (۲)$$

با این‌حال، با این تبدیل نیز نمی‌توان توصیف دقیقی از یک سیگنال را در اختیار داشت؛ زیرا اطلاعاتی که از یک سیگنال ارائه می‌دهد تنها مربوط به بازه‌های تابع پنجره است و نمی‌توان به‌طور دقیق اطلاع پیدا کرد که چه مؤلفه‌های فرکانسی در چه زمان‌هایی وجود دارند. از این‌رو، برای فائق آمدن بر این مشکلات و به‌دست آوردن جزئیات مناسب‌تر از پردازش یک سیگنال، روش تبدیل موجک جایگزین گردید. پردازش سیگنال‌های پیچیده، نیازمند استفاده از تابعی است که نسبت به زمان، تغییرات نامنظمی داشته باشد تا بتواند تقریب مناسب‌تری از یک سیگنال را ارائه دهد. تبدیل موجک، یکی از روش‌های تبدیل زمانی فرکانسی است که سیگنال مورد نظر را برحسب مجموعه‌ای از توابع موجک مقیاس و منتقل‌شده بیان می‌کند.

یک تابع موجک $\psi(t)$ به‌صورت زیر بیان می‌شود

[7]:

$$\psi_{s,\tau}(t)=\frac{1}{\sqrt{|s|}}\psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right) \quad (۳)$$

در رابطهٔ فوق s و τ به‌ترتیب پارامتر مقیاس و انتقال می‌باشند.

بااستفاده از پارامتر مقیاس می‌توان بازهٔ تابع موجک را منقبض یا منبسط نمود. بدین‌طریق، در مقیاس‌های بالا که تابع موجک منبسط می‌شود، مؤلفه‌های فرکانس پایین سیگنال و در مقیاس‌های پایین که تابع موجک منقبض می‌گردد، مؤلفه‌های فرکانس بالای سیگنال بررسی می‌گردند. پارامتر انتقال نیز به‌منظور قرارگیری تابع موجک در محل موردنظر از سیگنال موردبررسی به‌منظور محاسبهٔ یک تبدیل موجک به‌کار می‌رود.

باتوجه به حوزهٔ عملکرد محدود یک تابع موجک، دو کران بالا و پایین برای آن درنظر گرفته شده‌است که خارج از این بازه مقدار تابع موجک صفر می‌باشد:

$$\forall t\le LB:\psi(t)=0 \quad , \quad \forall t\ge UB:\psi(t)=0 \quad (٤)$$

در رابطهٔ (٤) LB و UB کران‌های پایین و بالا می‌باشند.

در تبدیل موجک همانند تبدیل فوریه، ضرایب آن بیانگر میزان شباهت می‌باشند با این تفاوت که در تبدیل فوریه، تابع سیگنال موردنظر در یک تابع سینوسی ضرب می‌شود و شباهت میان این دو تابع بررسی می‌گردد ولی در آنالیز موجک، برای تقریب دقیق‌تر از توابع موجک استفاده می‌شود و این توابع به‌طور جداگانه بر روی قطعه‌های مختلف سیگنال ضرب می‌شوند. ضرایب موجک به‌صورت رابطهٔ (۵) محاسبه می‌گردد.

$$C_{s,\tau}=\int_{-\infty}^{+\infty}f(t)\psi_{s,\tau}(t)dt \quad (۵)$$

در رابطهٔ (۵) هرقدر شباهت فرکانسی سیگنال با تابع موجک بیشتر باشد، مقدار ضریب موجک نیز بزرگ‌تر حاصل خواهد شد.

ناپیوستگی‌هایی که در یک سیگنال رخ می‌دهند به‌دلیل محتوای فرکانسی بالایی که دارند، تنها هنگامی که تابع موجک فرکانس بالاتری (پارامتر مقیاس پایین‌تر) دارد قابل مشاهده می‌باشند. به‌عبارت دیگر، در این حالت تابع موجک حساسیت بیشتری به جزئیات سیگنال یا همان ناپیوستگی‌ها نشان می‌دهد.

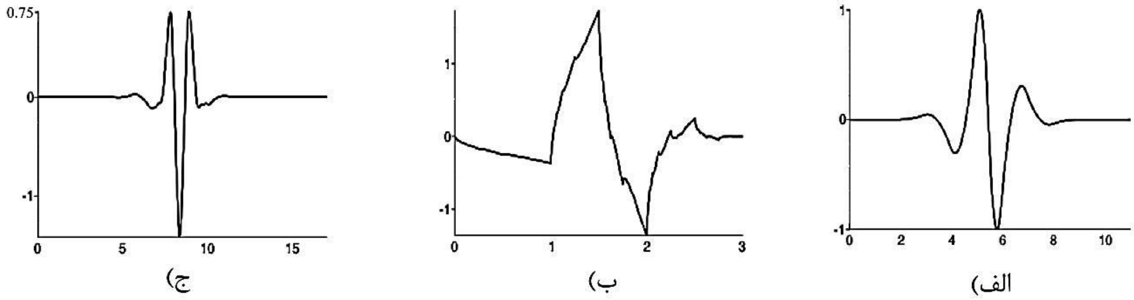
یکی از تبدیلات موجک پرکاربرد درزمینهٔ مشاهدهٔ ناپیوستگی و اغتشاشات کوچک در یک سیگنال، تبدیل موجک گسسته می‌باشد. روند پردازش سیگنال با تبدیل موجک گسسته، تجزیهٔ یک سیگنال در چند مرحله می‌باشد که توسط دو فیلتر انجام می‌گیرد. بدین‌طریق‌که در ابتدا سیگنال، از یک فیلتر پایین‌گذر عبور می‌کند و تمام مؤلفه‌های فرکانسی که بیشتر از نصف بزرگ‌ترین فرکانس موجود در سیگنال باشند، حذف می‌شوند؛ بدین‌ترتیب مؤلفه‌های باقی‌مانده به‌دلیل ماهیت فرکانسی پایین، شکل تقریبی از سیگنال را ارائه می‌دهند. این عمل برای یک فیلتر بالاگذر نیز انجام می‌گیرد و درنتیجهٔ این فیلتر مؤلفه‌های فرکانس بالای باقی‌مانده، جزئیات موجود در یک سیگنال از قبیل ناپیوستگی‌ها و اغتشاشات را ارائه می‌دهند.

در این تبدیل روند تغییر نرخ نمونه‌ها بر روی یک شبکهٔ دوتایی انجام می‌گیرد، بدین‌منظور ضرایب پیوستهٔ τ و s به‌صورت زیر گسسته می‌گردند:

$$s=2^j \quad , \quad \tau=k2^j \quad (٦)$$

که در این حالت j و k متناسب با هر گام تجزیه افزایش می‌یابند.

توابع موجک بایستی به‌نحوی انتخاب شوند تا علاوه‌بر شباهت فرکانسی با سیگنال، دارای محتوای فرکانسی بالایی نیز باشند تا بتوانند ناپیوستگی‌های بسیار کوچک موجود در سیگنال را به‌خوبی شناسایی نمایند. در این پژوهش سه تابع موجک برای بررسی این موضوع درنظر گرفته شده‌است تا تفاوت شکل تابع موجک در پردازش سیگنال بررسی گردد. این سه تابع در شکل (۱) نمایش داده شده‌است.



شکل ۱ سه تابع موجک به‌کار رفته در تحقیق حاضر الف)rbio3.5 ، ب)db2 ، ج)coif 3 [7]

جدول ۱ مشخصات مدل دیوار برشی فولادی [8]

نمونه	ابعاد ورق l×h×t (mm)*	ابعاد تیرها	ابعاد ستون‌ها	مشخصات نوع فولادها	
				المان‌های مرزی	ورق
SPSW2	۳۰۰۰×۳۰۰۰×۹/۳	W۱٤×۱۲۰	W۱٤×۳۱۱	ASTM A572 Gr.50	LYP100

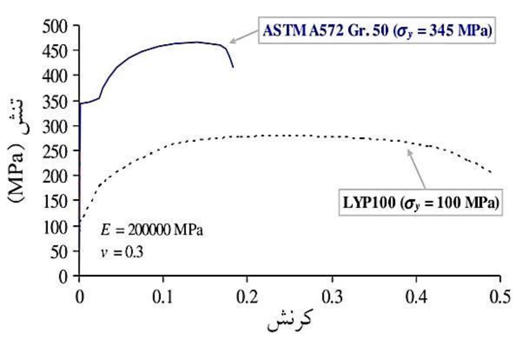
* l، h و t به ترتیب طول، ارتفاع و ضخامت ورق می‌باشند

مدل‌سازی دیوار برشی فولادی

مشخصات نمونه

ابعاد نمونهٔ دیوار برشی فولادی یک‌طبقه و یک‌دهانهٔ به‌کار رفته در این پژوهش در جدول (۱) ارائه شده‌است. نمونهٔ موردنظر به‌منظور صحت عملکرد روش ارائه‌شده براساس مرجع [8] درنظر گرفته شده‌است.

معیار تسلیم فون میسز برای جاری‌شدگی و معیارهای سخت‌شدگی ایزوتروپیک و جنبشی در تحلیل‌های غیرخطی مربوطهٔ به‌کار رفته‌اند. رابطهٔ تنش- کرنش و خصوصیات مکانیکی مصالح فولادی به‌کار رفته در این مدل‌سازی در شکل (۲) ارائه شده‌است.



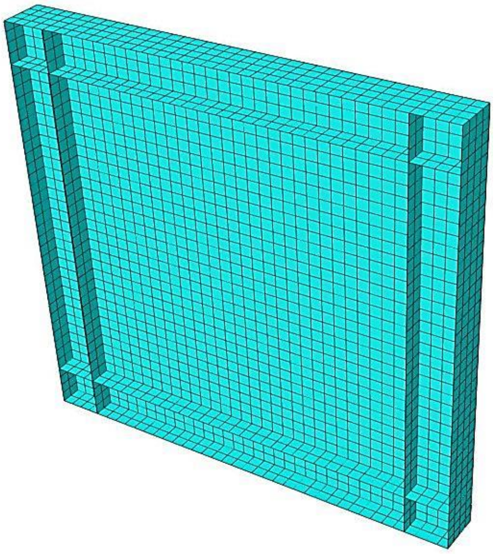
شکل ۲ مدل رفتاری نمونهٔ دیوار برشی فولادی [8]

مدل اجزای محدود

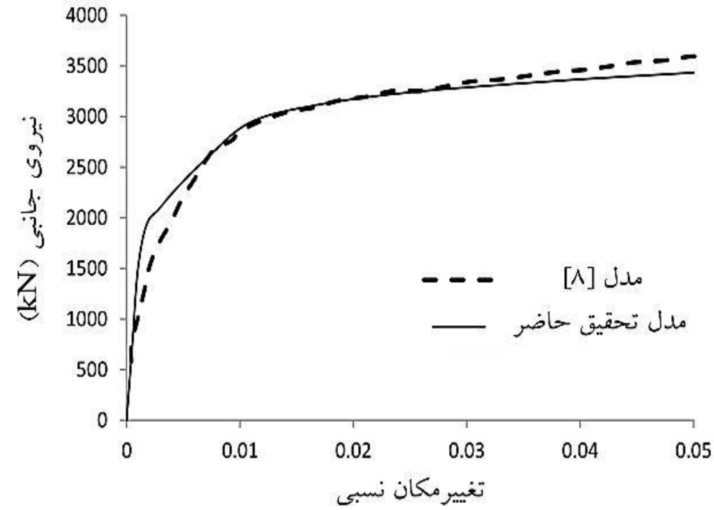
مدل‌سازی نمونه بااستفاده از نرم‌افزار ABAQUS6.14 انجام گرفته‌است. به‌منظور مدل‌سازی المان‌های مرزی و ورق جان، از المان‌های S4R که جزء المان‌های shell محسوب می‌شوند استفاده شده‌است. المان مذکور دارای سختی دورانی است و از این‌رو امکان تغییرشکل خارج از صفحه را فراهم می‌آورد [9].

برای مدل‌سازی شرایط تکیه‌گاهی، حرکت پای ستون‌ها در تمامی درجات آزادی مقید شده‌است. هم‌چنین اتصالات تیر به ستون نیز به‌صورت اتصال صلب درنظر گرفته شده‌است. المان‌های سخت‌کننده در چهار گوشهٔ دیوار برشی فولادی قرار گرفته‌اند. مدل اجزای محدود مذکور در نرم‌افزار ABAQUS در شکل (۳) نشان داده شده‌است.

به‌منظور صحت‌سنجی نمونهٔ موردنظر، منحنی‌های بار جانبی- تغییرمکان نسبی بررسی شده‌است. در شکل (٤) این منحنی برای دو نمونهٔ تحقیق حاضر و مدل مرجع ارائه شده‌است.



شکل ۳ مدل اجزای محدود تحقیق حاضر

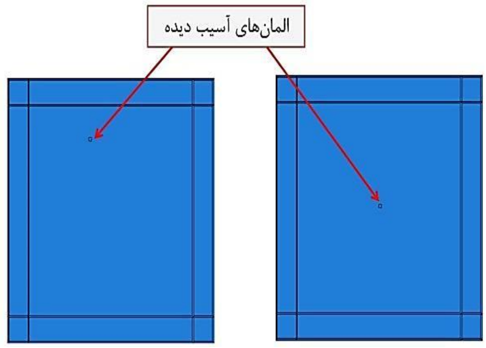


شکل ٤ منحنی بار جانبی– تغییرمکان نسبی [8]

همان‌طور که در شکل فوق مشخص است، مطابقت مناسبی بین نتایج دو مدل برقرار می‌باشد.

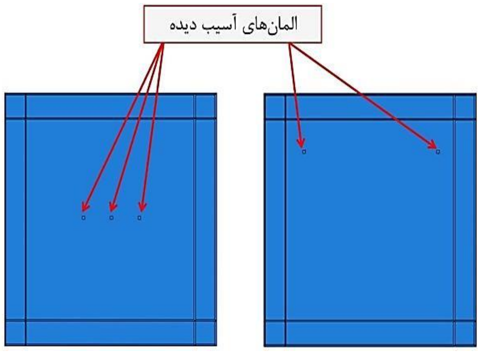
سناریوهای خرابی تعریف‌شده در سازه

به‌منظور تعریف خرابی در سازه، هشت سناریوی خرابی برروی ورق دیوار برشی فولادی جدول (۱) درنظر گرفته شده‌است. سناریوهای خرابی ایجادشده در جدول (۲) ارائه گردیده‌است و در شکل‌های (۵) و (٦) موقعیت آنها بر روی دیوار برشی فولادی نشان داده شده‌است. در این پژوهش، آسیب در قسمت‌های مختلف ورق و به‌وسیلهٔ کاهش در مدول الاستیسیته مصالح تعریف شده‌است تا دقت الگوریتم موجک در زمینهٔ شناسایی خرابی بررسی گردد.



الف) سناریوهای ۱ و ۲ ب) سناریوهای ۳ و ٤

شکل ۵ سناریوهای خرابی ۱ تا ٤



الف) سناریوهای ۵ و ٦ ب) سناریوهای ۷ و ۸

شکل ٦ سناریوهای خرابی ۵ تا ۸

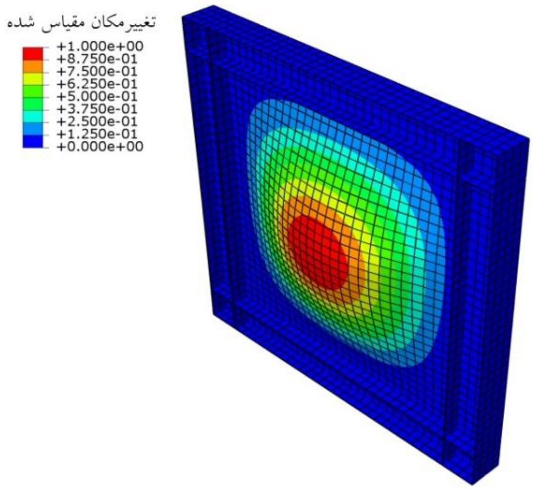
جدول ۲ سناریوهای خرابی تعریف‌شده در مدل دیوار برشی فولادی (مبدأ: گوشه پایین ورق سمت چپ)

سناریوی خرابی	شدت آسیب	موقعیت آسیب
۱	یک المان ۵×۵ سانتی‌متر با کاهش مدول الاستیسیته ۲۰ درصد	X = ۱/۵ m , Y = ۱/۵m
۲	یک المان ۵×۵ سانتی‌متر با کاهش مدول الاستیسیته ۱۰ درصد	X = ۱/۵ m , Y = ۱/۵m
۳	یک المان ۵×۵ سانتی‌متر با کاهش مدول الاستیسیته ۲۰ درصد	X = ۱/۱ m , Y = ۲/۵۵m
٤	یک المان ۵×۵ سانتی‌متر با کاهش مدول الاستیسیته ۱۰ درصد	X = ۱/۱ m , Y = ۲/۵۵m
۵	دو المان ۵×۵ سانتی‌متر با کاهش مدول الاستیسیته ۲۰ درصد	X_1 = ۰/۳ m , X_2 = ۲/۷m Y = ۲/۵۵m
٦	دو المان ۵×۵ سانتی‌متر با کاهش مدول الاستیسیته ۱۰ درصد	X_1 = ۰/۳ m , X_2 = ۲/۷m Y = ۲/۵۵m
۷	سه المان ۵×۵ سانتی‌متر با کاهش مدول الاستیسیته ۲۰ درصد	X_1 = ۱ m , X_2 = ۱/۵ m , X_3 = ۲m Y =۱/۵m
۸	سه المان ۵×۵ سانتی‌متر با کاهش مدول الاستیسیته ۱۰ درصد	X_1 = ۱ m , X_2 = ۱/۵ m , X_3 = ۲m Y =۱/۵m

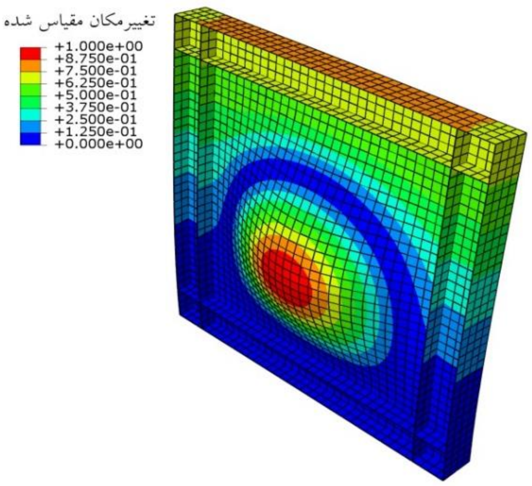
پاسخ مودال نمونه

همان‌طور که اشاره شد، پردازش سیگنال برروی پاسخ‌های به‌دست‌آمده از سازه انجام می‌گیرد. در این مطالعه، پاسخ‌های مودال دیوار برشی فولادی در هر تراز به‌عنوان سیگنال ورودی توسط سنسورهای تعریف‌شده ثبت می‌گردند و بااستفاده از تبدیل موجک، پردازش سیگنال برروی دیوار انجام می‌گیرد. سپس این تبدیل در صورت مشاهدهٔ آسیب در طول سازه، موقعیت دقیق آن را نشان می‌دهد. باتوجه به این‌که در طراحی دیوار برشی فولادی سخت‌نشده، ورق وارد مرحلهٔ غیرخطی می‌شود به‌منظور استفاده از شکل‌های مودی برای تشخیص خرابی، فرض می‌شود آسیب در ناحیهٔ خطی

از سازه رخ داده‌است. اشکال مودی اول و دوم نمونه، در شکل‌های (۷) و (۸) نشان داده شده‌است. لازم به ذکر است در این پژوهش چگالی فولاد ۷۸۵۰ kg/m^3 لحاظ شده‌است.



شکل ۷ شکل مودی اول دیوار برشی فولادی



شکل ۸ شکل مودی دوم دیوار برشی فولادی

باتوجه به سختی کم دیوار برشی فولادی در راستای خارج از صفحه، مودهای کمانشی غالب، مودهای خارج از صفحه می‌باشند. همچنین مطابق با عمل همپایه کردن مودها، در وسط ورق که حداکثر تغییرمکان را دارا می‌باشد، تغییرمکان مقیاس‌شدهٔ وسط ورق برابر واحد و سایر عناصر متناظر با آن تعیین شده‌است [10].

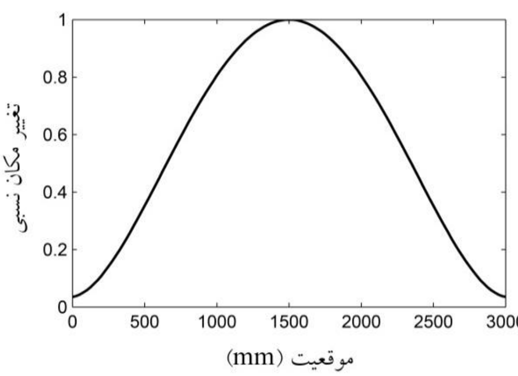
تشخیص خرابی دیوار برشی فولادی

خرابی و آسیب برروی یک سازه باعث کاهش سختی سازه موردنظر می‌گردد. باتوجه به این‌که سختی یک سازه رابطهٔ مستقیم با فرکانس طبیعی آن دارد، کاهش آن باعث کاهش فرکانس‌های طبیعی در یک آنالیز مودال خواهد شد. لذا با مقایسهٔ فرکانس‌های طبیعی دو سازهٔ سالم و آسیب‌دیده، می‌توان تأثیر خرابی را برروی کاهش سختی یک سازه مشاهده نمود. این موضوع در جدول (۳) برای دو شکل مودی اول سازه در سناریوی خرابی اول بررسی شده‌است.

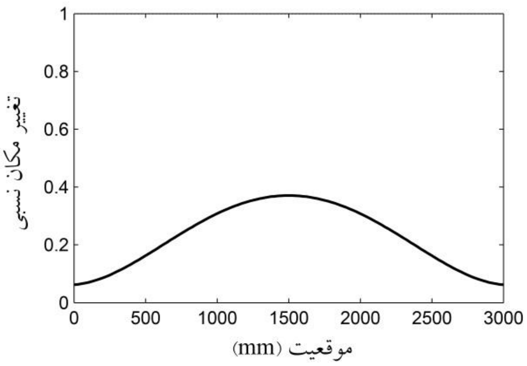
جدول ۳ مقایسهٔ فرکانس‌های طبیعی دو نمونه دیوار برشی فولادی سالم و آسیب‌دیده (سناریوی خرابی اول)

مود	فرکانس طبیعی سازهٔ سالم (هرتز)	فرکانس طبیعی سازهٔ آسیب‌دیده (هرتز)
مود اول	۸/٤٦۰۲	۸/٤۵۷۱
مود دوم	۱۱/۵۳۸	۱۱/٤۹۰

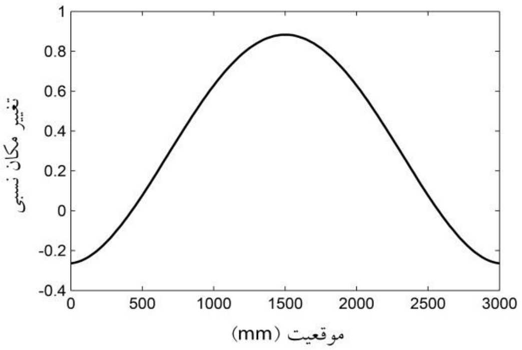
در این مطالعه برای سیگنال ورودی الگوریتم موجک از شکل مودی اول و دوم سازه استفاده شده‌است. سیگنال‌های مذکور برای هشت سناریوی خرابی تعریف‌شده در شکل‌های (۹) تا (۱۲) ارائه شده‌است. باتوجه به این‌که سناریوهای خرابی ۱، ۲، ۷ و ۸ در یک تراز و همچنین سناریوهای خرابی ۳ تا ٦ در تراز یکسان دیگری قرار دارند، تغییرمکان شکل‌های مودی آنها مانند هم می‌باشد.



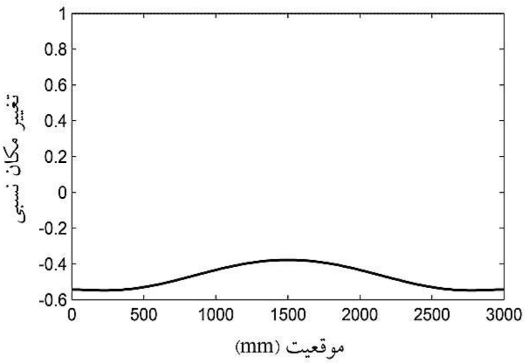
شکل ۹ شکل مودی اول سناریوهای ۱، ۲، ۷ و ۸



شکل ١٠ شکل مودی اول سناریوهای ٣ تا ٦



شکل ١١ شکل مودی دوم سناریوهای ١، ٢، ٧ و ٨

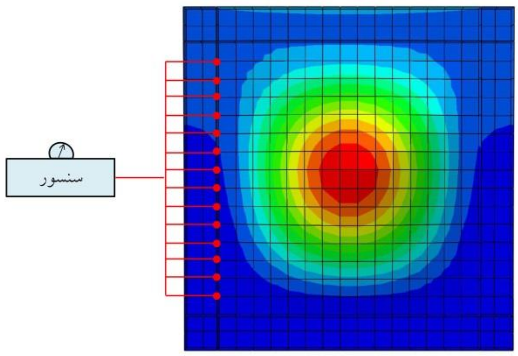


شکل ١٢ شکل مودی دوم سناریوهای ٣ تا ٦

همان‌طور که در شکل‌های ارائه‌شده مشخص است، هیچ‌گونه اثری از آسیب در پاسخ‌ها مشاهده نمی‌شود. با این وجود، الگوریتم موجک قادر به شناسایی محل دقیق آسیب‌های به‌وجود آمده می‌باشد.

این عمل را با نصب سنسور در نقاط مشخصی از سازه انجام می‌دهیم بدین‌طریق که هر سنسور پاسخ هر تراز از سازهٔ شبکه‌بندی‌شده را به الگوریتم موجک وارد می‌نماید، سپس درصورت وجود خرابی، محل و موقعیت دقیق آسیب را نشان می‌دهد. با این‌حال، در کارهای عملی بایستی تعداد نقاط نمونه‌برداری هر سنسور به‌گونه‌ای باشد که علاوه‌بر اقتصادی بودن طرح، تعیین محل دقیق آسیب نیز به‌راحتی امکان‌پذیر باشد.

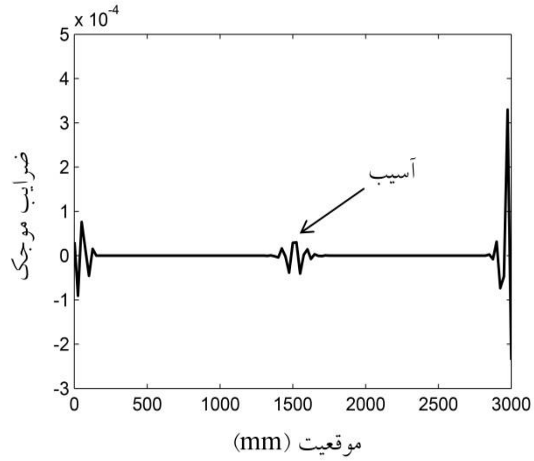
باتوجه به این‌که سناریوهای خرابی در ورق تعریف شده‌است، سنسورها در ابتدای هر تراز از ورق شبکه‌بندی‌شده تعبیه شده‌اند تا بتوان برای هر ردیف به‌صورت جداگانه پردازش سیگنال را انجام داد. موقعیت قرارگیری سنسورها، در ورق نمونهٔ شبکه‌بندی‌شده در شکل (١٣) نشان داده شده‌است. موقعیت قرارگیری سنسورها، بدین‌صورت است که برای کل طول دیوار در هر نقطه نمونه‌برداری تعبیه شده‌است تا بتواند سیگنال‌های حاصل از شکل مودی را برای کل دیوار ثبت نماید. به‌عبارتی شکل‌های مودی به‌دست‌آمده، همان سیگنال‌هایی است که توسط سنسورها ثبت می‌شوند.



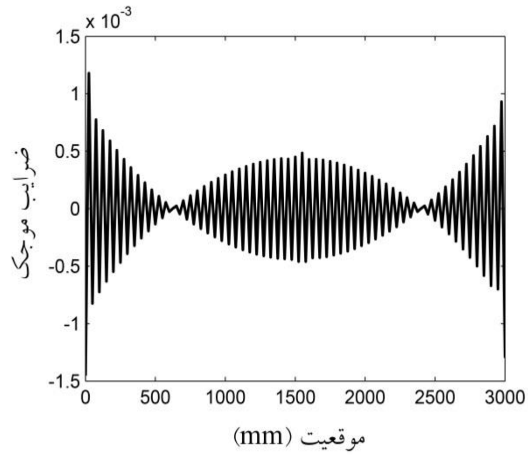
شکل ١٣ موقعیت قرارگیری سنسورها در ورق

از آن‌جایی که خرابی‌های تعریف‌شده مقادیر کوچکی می‌باشند، در پاسخ‌های سازه به‌صورت یک اغتشاش بسیار کوچک ظاهر می‌گردند. با توجه به این‌که ضرایب جزئیات الگوریتم موجک گسسته در نرم‌افزار MATLAB، مؤلفه‌های فرکانس بالا را تجزیه می‌نماید بایستی شناسایی خرابی را در این فیلتر بررسی

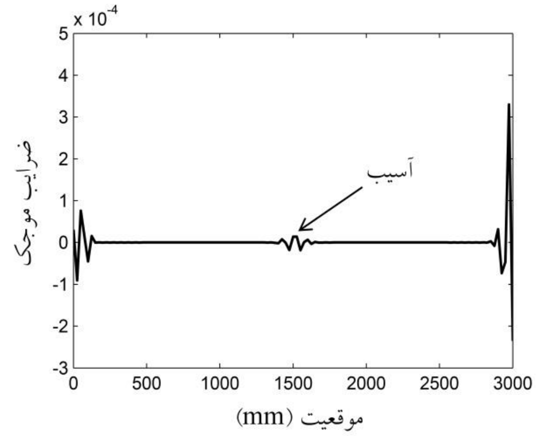
نمود. بدین‌منظور، در این بخش بااستفاده از الگوریتم موجک گسسته، تشخیص سناریوهای خرابی تعریف‌شده در دیوار برشی فولادی مورد بررسی قرار می‌گیرد. این موضوع بااستفاده از توابع موجک تعریف‌شده در بخش دوم بررسی می‌شود. نتایج شناسایی آسیب سناریوهای خرابی اول و دوم برای شکل مودی اول سازه در شکل‌های (۱٤) تا (۱۷) ارائه شده‌است. برای بررسی تفاوت توابع موجک در پردازش سیگنال، این عمل بااستفاده از دو تابع موجک rbio3.5 و db2 انجام شده‌است.



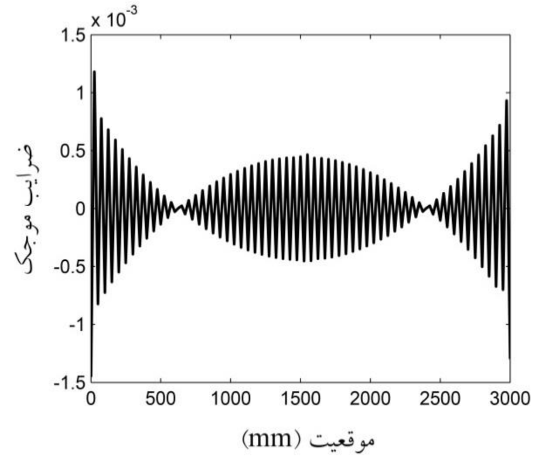
شکل ۱٤ تعیین محل آسیب تراز سناریوی خرابی اول با تابع موجک rbio3.5



شکل ۱۵ تعیین محل آسیب تراز سناریوی خرابی اول با تابع موجک db2



شکل ۱٦ تعیین محل آسیب تراز سناریوی خرابی دوم با تابع موجک rbio3.5



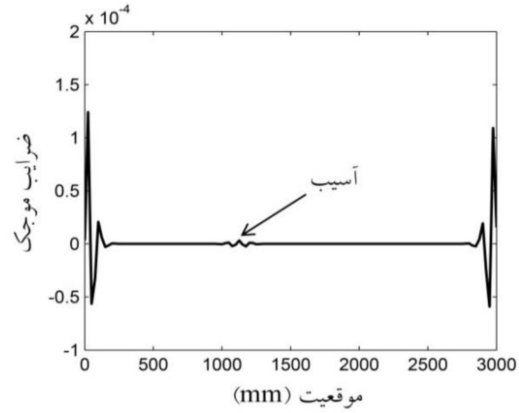
شکل ۱۷ تعیین محل آسیب تراز سناریوی خرابی دوم با تابع موجک db2

همان‌طور که انتظار می‌رفت به‌دلیل شباهت بیشتر تابع موجک rbio3.5 با تابع سیگنال، تنها این تابع قادر به شناسایی موقعیت دقیق آسیب بود. شناسایی موقعیت دقیق آسیب حتی برای کاهش آسیب به‌میزان ۱۰ درصد، نشان‌دهندهٔ کارایی بسیار مناسب الگوریتم موجک در زمینهٔ تشخیص خرابی می‌باشد. هم‌چنین با کاهش میزان آسیب برای سناریوی خرابی دوم نسبت به سناریوی خرابی اول، میزان اغتشاش به‌وجود آمده در سیگنال خروجی کمتر شده‌است.

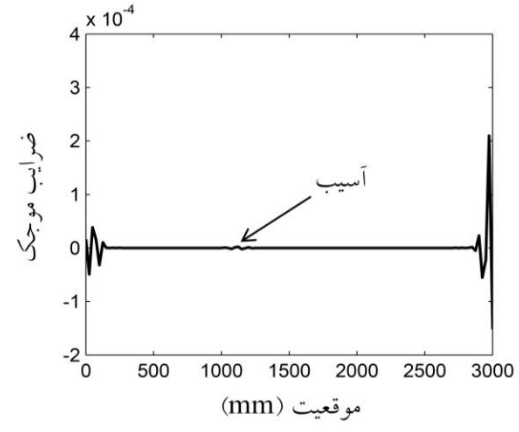
با این‌که تابع موجک rbio3.5 موقعیت دقیق آسیب را شناسایی نمود با این‌حال نمی‌توان به‌طور دقیق بیان نمود که این تابع موجک باتوجه به شباهت بیشتر با تابع

سیگنال، توانایی شناسایی آسیب برای تمام موقعیت‌های خرابی دیوار را دارا می‌باشد. همان‌طور که اشاره شد یکی دیگر از موارد مهم در به‌کارگیری تابع موجک برای پردازش سیگنال، محتوای فرکانسی بالای تابع موجک می‌باشد. این موضوع به‌خصوص زمانی که اغتشاش به‌وجود آمده در تابع سیگنال کوچک‌تر باشد، بیشتر اهمیت پیدا می‌نماید. زیرا در چنین حالتی ممکن است، توابع موجکی که محتوای فرکانسی پایین‌تری دارند نتوانند مؤلفهٔ فرکانس بالای آسیب به‌وجود آمده را شناسایی نمایند.

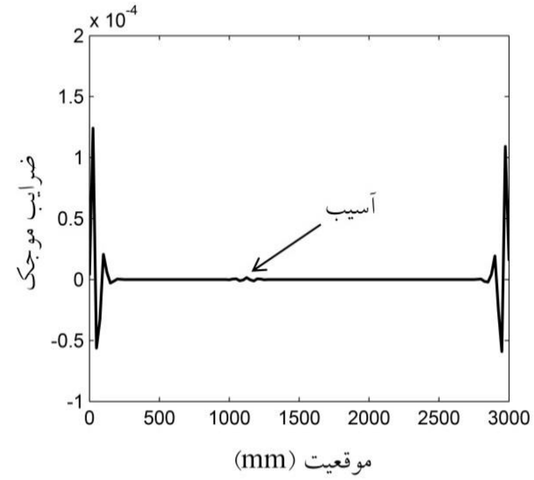
این موضوع برای سناریوهای خرابی سوم و چهارم بااستفاده از دو تابع موجک rbio3.5 و coif 3 برای شکل مودی اول در شکل‌های (۱۸) تا (۲۱) ارائه شده‌است.



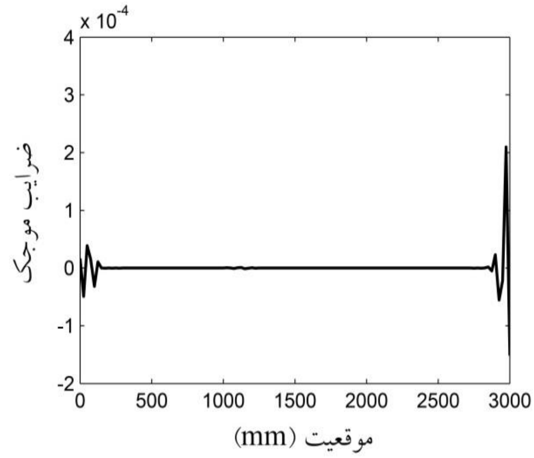
شکل ۱۸ تعیین محل آسیب تراز سناریوی خرابی سوم با تابع موجک coif 3



شکل ۱۹ تعیین محل آسیب تراز سناریوی خرابی سوم با تابع موجک rbio3.5



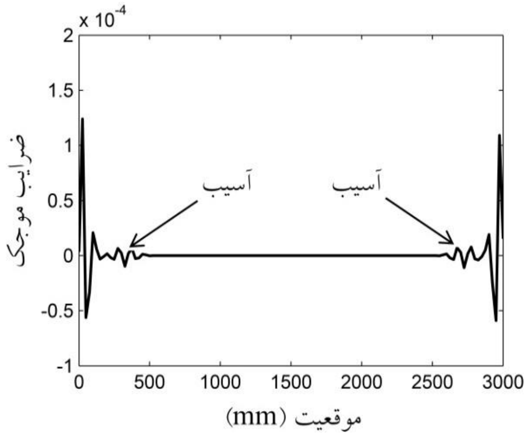
شکل ۲۰ تعیین محل آسیب تراز سناریوی خرابی چهارم با تابع موجک coif 3



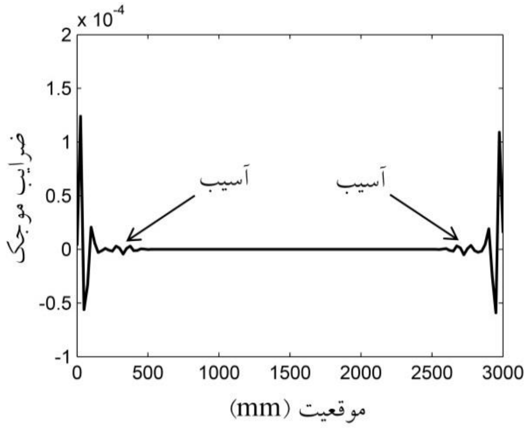
شکل ۲۱ تعیین محل آسیب تراز سناریوی خرابی چهارم با تابع موجک rbio3.5

شکل‌های بالا نشان می‌دهد تابع موجک coif 3 به‌دلیل محتوای فرکانس بالاتر درمقایسه با تابع موجک rbio3.5، توانست موقعیت آسیب سناریوی خرابی چهارم را که آسیب کم‌تری در مقایسه با سناریوی خرابی سوم متحمل شده بود بهتر شناسایی نماید.

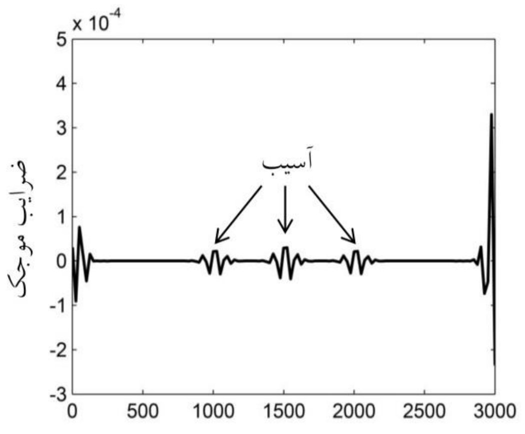
نتایج برای سایر سناریوهای خرابی نیز به‌همین ترتیب می‌باشد. تشخیص آسیب سناریوهای خرابی باقی‌مانده نیز بااستفاده از دو تابع موجک coif 3 و rbio3.5 در شکل‌های (۲۲) تا (۲۵) ارائه شده‌است.



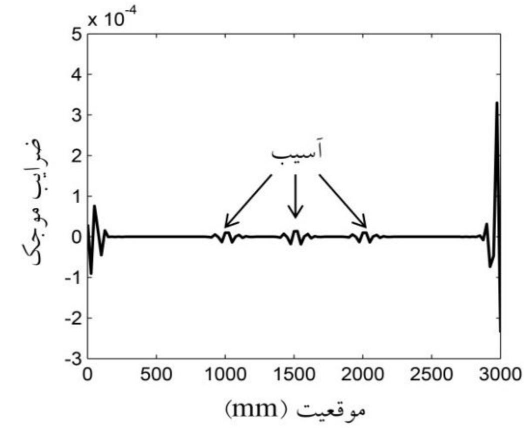
شکل ۲۲ تعیین محل آسیب تراز سناریوی خرابی پنجم با تابع موجک coif 3



شکل ۲۳ تعیین محل آسیب تراز سناریوی خرابی ششم با تابع موجک coif 3



شکل ۲٤ تعیین محل آسیب تراز سناریوی خرابی هفتم با تابع موجک rbio3.5

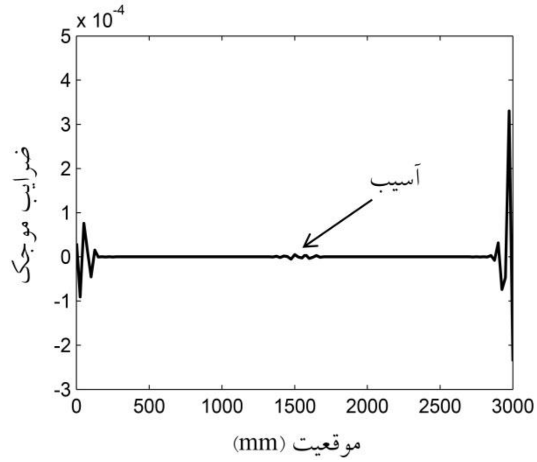


شکل ۲۵ تعیین محل آسیب تراز سناریوی خرابی هشتم با تابع موجک rbio3.5

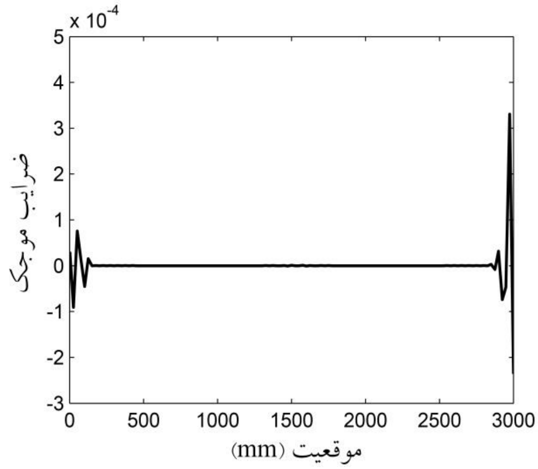
همان‌طور که اشاره شد، در این پژوهش شناسایی آسیب در دیوار برشی فولادی بااستفاده از الگوریتم موجک، به‌کمک سنسورهای تعبیه‌شده در سازه انجام گرفته‌است. بدین‌منظور الگوریتم موجک پاسخ هر تراز از سناریوهای خرابی را از سنسورها می‌گیرد و پس از پردازش سیگنال محل دقیق آسیب را نشان می‌دهد. به‌منظور صحت عملکرد سنسورها، اگر این عمل برروی سایر نقاط نمونه‌برداری بررسی شود، مشاهده می‌گردد که اثر آسیب تنها در ترازهای نزدیک به خرابی قابل مشاهده است و با فاصله از تراز مذکور اثر خرابی از بین خواهد رفت. هم‌چنین می‌توان با افزایش تعداد سنسورها، خرابی را تنها در تراز مربوط به خودش شناسایی نمود. تشخیص خرابی در این مطالعه، با ۱۲۰ نقطهٔ نمونه‌برداری در هر تراز از سنسورها انجام گرفته است.

به‌طور مثال برای سناریوی خرابی اول، خرابی المان مرکز ورق بر روی تراز بالاتر از خود نیز تأثیر اندکی گذاشته‌است که الگوریتم موجک قادر به شناسایی این تأثیر جزئی نیز شده‌است، ولی اثر آسیب بر روی دو تراز بالاتر از تراز سناریوی خرابی به‌طور کامل از بین رفته‌است. لازم به ذکر است، این موضوع برای ترازهای پایین‌تر نیز برقرار می‌باشد.

شکل‌های (۲۶) و (۲۷) دو تراز فوقانی سناریوی خرابی اول را نشان می‌دهند که خرابی تنها در تراز بالای سناریوی خرابی اثر اندکی گذاشته‌است.



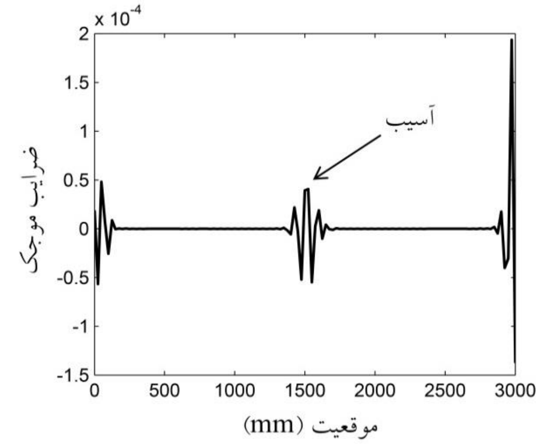
شکل ۲۶ تعیین محل آسیب تراز فوقانی سناریوی خرابی اول با تابع موجک rbio3.5



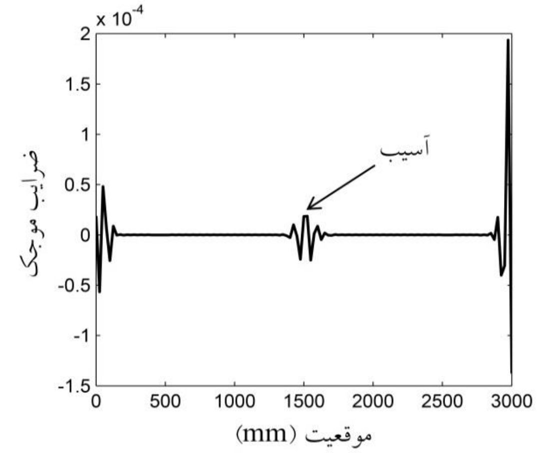
شکل ۲۷ تعیین محل آسیب دو تراز بالاتر از سناریوی خرابی اول با تابع موجک rbio3.5

نتایج شناسایی آسیب برای شکل مودی اول سازه در تمامی سناریوهای خرابی تعریف‌شده بااستفاده از الگوریتم موجک بررسی گردید. می‌توان برای شکل مودی دوم سازه نیز این موضوع را بررسی نمود.

بدین‌منظور، شناسایی آسیب برای سناریوهای خرابی اول و دوم بااستفاده از شکل مودی دوم سازه در شکل‌های (۲۸) و (۲۹) ارائه شده‌است.



شکل ۲۸ تشخیص خرابی سناریوی اول با rbio3.5



شکل ۲۹ تشخیص خرابی سناریوی دوم با rbio3.5

نتایج فوق نشان می‌دهند بااستفاده از تبدیل موجک می‌توان آسیب را در هر موقعیت و شدتی برای شکل‌های مودی مختلف با دقت بالایی شناسایی نمود.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه شرح مختصری از الگوریتم موجک و کاربرد آن در پردازش سیگنال به‌منظور تشخیص خرابی یک نمونه دیوار برشی فولادی ارائه گردید. بدین منظور پس از تعریف هشت سناریوی خرابی، یک تحلیل مودال بر روی سازه انجام گرفت و سنسورهای

تعبیه‌شده در دیوار، وظیفه داشتند پاسخ مودال سازه را در هر تراز ثبت و به‌عنوان سیگنال ورودی به تبدیل موجک وارد نمایند. این تبدیل نیز با تجزیهٔ سیگنال ورودی در هر تراز متناظر با سناریوی خرابی، محل و موقعیت دقیق آسیب را با دقت بالایی شناسایی نمود. نتایج نشان داد می‌توان تشخیص خرابی را بااستفاده از تبدیل موجک برای شکل‌های مودی مختلف نیز بررسی کرد. این موضوع برای خرابی‌های بسیار کوچک در سازه بررسی گردید که بیانگر دقت بالای تبدیل موجک در زمینهٔ شناسایی آسیب در سازه‌ها می‌باشد. با این‌حال، شناسایی آسیب در سازه بااستفاده از این الگوریتم نیازمند انتخاب تابع موجک مناسب می‌باشد. بدین منظور بایستی تابع موجکی را انتخاب نمود که علاوه بر شباهت فرکانسی با سیگنال موردنظر، محتوای فرکانسی بالایی نیز داشته باشد تا بتواند درصورت وجود اغتشاشات کوچک به‌وجودآمده در اثر آسیب در پاسخ‌های سازه، آنها را نیز به‌خوبی شناسایی نماید. هم‌چنین با درنظرگیری جنبه‌های اقتصادی طرح، می‌توان با افزایش تعداد سنسورها، سناریوی خرابی به‌وجودآمده را تنها در تراز مربوط به خودش شناسایی نمود.

مراجع

1. Bayissa, W., Haritos, N., and Thelandersson, S., "Vibration-based Structural Damage Identification Using Wavelet Transform", Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 22, pp. 1194-1215, (2008).
2. Rucka, M., "Damage Detection in Beams Using Wavelet Transform on Higher Vibration Modes," *Journal of Theoretical and Applied Mechanics,* Vol. 49, pp. 399-417, (2011).
3. Solís, M., Algaba, M., and Galvín, P., "Continuous wavelet analysis of mode shapes differences for damage detection", Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 40, pp. 645-666, (2013).
4. Amiri, G. G., Jalalinia, M., Hosseinzadeh, A. Z., and Nasrollahi, A., "Multiple Crack Identification in Euler Beams by Means of B-spline Wavelet", Archive of Applied Mechanics, Vol. 85, pp. 503-515, (2015).
5. Patel, S., Chourasia, A., Panigrahi, S., Parashar, J., Parvez, N., and Kumar, M., "Damage Identification of RC Structures Using Wavelet Transformation", Procedia Engineering, Vol. 144, pp. 336-342, (2016).
6. Mallat, S., A wavelet tour of signal processing: the sparse way: Academic press, (2008).
7. Misiti, M., Misiti, Y., Oppenheim, G., and Poggi, J. M., "Wavelet toolbox", The MathWorks Inc., Natick, MA, (1996).
8. Zirakian, T., and Zhang, J., "Structural Performance of Unstiffened Low Yield Point Steel Plate Shear Walls", *Journal of Constructional Steel Research,* Vol. 112, pp. 40-53, (2015).
9. Hibbitt, Karlsson, and Sorensen, ABAQUS/standard user's Manual Vol. 1: Hibbitt, Karlsson & Sorensen, (2001).
10. Chopra, A. K., "Dynamics of structures", Prentice Hall New Jersey, Vol. 3, (1995).